

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (U8PT0)



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Pat ntschrift
10 DE 44 34 409 C 1

51 Int. Cl.⁸:
B 23 K 26/04

21 Aktenzeichen: P 44 34 409.0-34
22 Anmeldetag: 26. 9. 94
43 Offenlegungstag: —
46 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 4. 4. 96

DE 44 34 409 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

74 Vertreter:

Sturies, H., Dipl.-Phys. Dr.-Ing.; Eichler, P., Dipl.-Ing.,
Pat.-Anwälte, 42289 Wuppertal

72 Erfinder:

Beyer, Eckhard, Dr.-Ing., 52159 Roetgen, DE;
Beersiek, Jörg, Dipl.-Phys., 52080 Aachen, DE;
Schulz, Wolfgang, Dr.rer.nat., 52379 Langerwehe,
DE; Nitsch, Holger, Dipl.-Ing., 52064 Aachen, DE

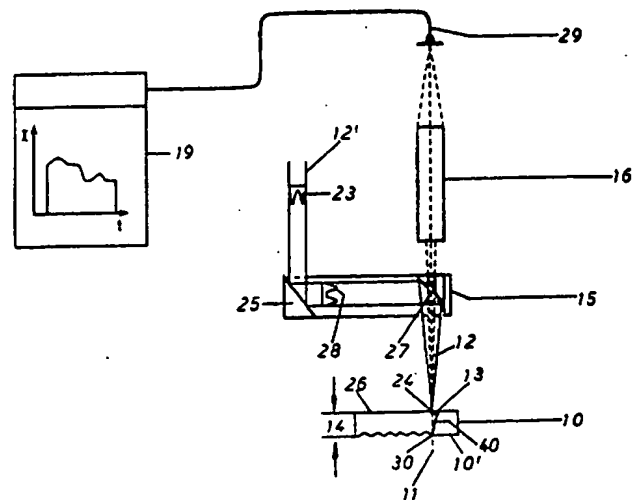
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 41 06 008 C2
WO 93 03 881 A1

J. Milberg, u.a., »Schweißen mit dem CO₂-Laser«, in:
»wt Wissenschaft und Technik«, Mai 1992, S. 30-32;

54 Verfahren und Vorrichtung zum Materialbearbeiten mit Plasma induzierender Laserstrahlung

57 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Material-
bearbeiten mit Plasma induzierender Hochenergiestrahlung,
insbesondere Laserstrahlung, bei dem aus dem Bereich des
Werkstücks (10) herrührende Strahlung in der Achse (11) der
auf das Werkstück (10) fokussierten Laserstrahlung (12) in
Abhängigkeit von der Zeit beobachtet wird.
Um ein Maß für die Eindringtiefe der Dampfkapillaren (13) in
das Werkstück (10) zu erhalten, wird so verfahren, daß
ausschließlich der Querschnitt der Dampfkapillaren (13) mit
einer die gesamte Werkstückdicke (14) erfassenden Tiefen-
schärfe beobachtet wird, und daß der Mittelwert der
Intensität der Plasmastrahlung als Maß für die Eindringtiefe
verwendet wird.



DE 44 34 409 C 1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1 und auf Vorrichtungen mit den Merkmalen des Oberbegriffs der Ansprüche 4 und 5.

Verfahren mit den Verfahrensmerkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1 sind als Laserschweißverfahren allgemein bekannt. Die dabei beobachteten optischen und akustischen Signale werden zur Überwachung und Steuerung eingesetzt. Derartige Signale rühren von der Werkstückoberfläche oder von oberhalb der Werkstückoberfläche her. Dabei ist z. B. die Detektion einer Durchschweißung nur in isolierten Parameterbereichen möglich. Des weiteren ist es allgemein bekannt, die Unterseite eines Werkstücks zu beobachten um eine Durchschweißung zu ermitteln. Das Werkstück ist jedoch während des industriellen Fertigungsprozesses an der Unterseite häufig nur schwer zugänglich. Es besteht daher Bedarf, die Einschweißtiefe in das Werkstück von dessen Oberseite her zu ermitteln, also von der Seite, von der die Laserstrahlung zugeführt wird.

Aus J. Milberg, u. a., "Schweißen mit dem CO₂-Laser", in: "Wissenschaft und Technik", Mai 1992, S. 30 bis 32 ist ein Verfahren bekannt, bei dem das Erkennen des Durchschweißgrads auf der Beobachtung von Linien des ionisierten Teils des in die Dampfkapillare hineindiffundierenden Schutzgases Argon beruht. Das bei diesem Verfahren während der Einschweißung vermittelte Signal verhält sich proportional zur Einschweißtiefe. Zur Durchführung des bekannten Verfahrens kommt neben dem Einsatz von Gitterspektrographen auch die Verwendung von Photodioden in Betracht.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1 so zu verbessern, daß die Eindringtiefe von oberhalb des Werkstücks zuverlässig fortlaufend während des Materialbearbeitens in meßtechnisch einfacher Weise ermittelt werden kann.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Kennzeichens des Anspruchs 1 gelöst.

Für die Erfindung ist von Bedeutung, daß eine Beobachtung in die Tiefe der Wechselwirkungszone der Laserstrahlung mit dem Werkstück hinein erfolgt. Es ist also erforderlich, Signale aus dem Inneren der Dampfkapillare zuverlässig zu erfassen und zu verwerten. Das wird dadurch erreicht, daß ausschließlich der Querschnitt der Dampfkapillaren beobachtet und so störende seitliche Signale ausgeschaltet werden. Die dafür erforderliche Tiefenschärfe wird so bestimmt, daß die gesamte Werkstückdicke bei der Beobachtung erfaßt wird. Beobachtet wird die Leuchtintensität des Plasmas, das bei der Plasmabearbeitung entsteht. Da diese Intensität jedoch stark fluktuiert, wird der Mittelwert der Intensität der Plasmastrahlung als Maß für die Eindringtiefe verwendet. Wenn die Laserstrahlung so tief in das Werkstück eindringt, daß die Tiefe der Wechselwirkungszone gleich der Werkstückdicke ist, liegt eine Durchschweißung vor. Es ergibt sich ein charakteristisches Abweichen des Mittelwerts der Intensität im zeitlichen Verlauf des Vorgangs der Materialbearbeitung. Bedarfsweise kann das Bearbeitungsverfahren abgebrochen oder so gestaltet werden, daß ein Durchschweißen zur Vermeidung eines unerwünschten Bearbeitungsergebnisses vermieden wird.

Bei dem vorbeschriebenen Verfahren wird vereinfachend angenommen, daß die Dichte und die Temperatur der strahlungsemitierenden Teilchen in der Dampfkapa-

pillaren konstant sind. Unter dieser Voraussetzung ist die gemessene Strahlungsintensität in erster Näherung proportional der Eindringtiefe der Dampfkapillaren in das Werkstück. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Einflußfaktoren auf die Dichte und die Temperatur innerhalb der Dampfkapillaren, so daß die angenommene Konstanz nicht gegeben ist. Einflußgrößen sind beispielsweise dynamische Vorgänge innerhalb der Dampfkapillaren infolge von Bewegungen der Absorptions- und der Schmelzfront. Auch die Bearbeitungsgeometrie spielt eine maßgebliche Rolle. Dadurch bedingte Intensitätsschwankungen stören das Meßergebnis. Sie können jedoch dadurch ausgeschaltet werden, daß der Mittelwert der Strahlungsintensität unter Ausschaltung von Intensitätsspitzenwerten bestimmt wird, die gleichzeitig mit optischen und/oder akustischen Signalen auftreten, welche seitlich der fokussierten Laserstrahlung ermittelt werden.

Die Schwankungen der Strahlungsintensität enthalten jedoch auch Informationen über die Vorgänge in der Dampfkapillaren bzw. über den Ort dieser Vorgänge. Um diesen Entstehungsort zu ermitteln, kann das Verfahren so durchgeführt werden, daß der Entstehungsort von Intensitätsspitzenwerten in der Dampfkapillaren durch Laufzeitdifferenzmessung axialer und seitlicher einander zeitlich zugehöriger Meßwerte bestimmt wird. An diesen Orten von Intensitätsspitzenwerten können Bearbeitungsfehler auftreten, bedingt durch Spritzer und Poren. Es wird eine Qualitätskontrolle des Bearbeitungsverfahrens ermöglicht.

Aus der DE 41 06 008 C2 ist eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 4 bekannt.

Um die Eindringtiefe der Wechselwirkungszone der Laserstrahlung bzw. der Dampfkapillaren in das Werkstück in zeitlichem Ablauf fortwährend ermitteln zu können und zugleich in der Lage zu sein, Informationen aus unterschiedlich tiefen Bereichen der Dampfkapillare zu gewinnen, wird die Vorrichtung unter Anwendung der vorbeschriebenen Verfahren so ausgebildet, wie es in dem Kennzeichen des Anspruchs 4 angegeben wurde. Die Beschränkung des radialen Beobachtungsbereichs der Beobachtungsoptik auf den Querschnitt der Dampfkapillaren gewährleistet die Ausschaltung von Einflüssen aus dem Bereich von Werkstücken um die Dampfkapillare herum. Die Meßeinrichtung bildet einen Mittelwert der Intensität der Plasmastrahlung zur Ausschaltung von Fluktuationen, die das Meßergebnis der Eindringtiefe in unerwünschter Weise beeinträchtigen. Mit Hilfe der Beobachtungsoptik können aus unterschiedlichen Tiefen der Dampfkapillare herrührende Strahlungssignale ermittelt und danach von der Auswerteeinheit ausgewertet werden, beispielsweise im Sinne einer Lokalisierung eines Intensitätsspitzenwertes.

Dieselbe vorgenannte Aufgabe wird durch die Merkmale des Kennzeichens des Anspruchs 5 gelöst. Dieser Bezugswert ist beispielsweise der Mittelwert der Strahlungsintensität.

Um die vorgenannte Vorrichtung im Sinne einer einfachen Ausbildung zu gestalten, sind die Lichtsensoren Lichtwellenleiter.

Eine weitere Präzisierung eines Meßergebnisses der vorbeschriebenen Vorrichtungen ist dadurch möglich, daß der spektrale Bereich der vom Werkstück herrührenden Strahlung mit einem Bandpaßfilter beschränkt ist. Es werden spektrale Bereiche des Plasmaleuchtens ausgeschaltet, welche Informationen aus der Tiefe der Dampfkapillaren nicht deutlich genug darstellen.

Wenn die Vorrichtung so ausgebildet wird, daß die Laserstrahlung einen Ringmode aufweist, daß ein Lichtspiegel als Fokussierspiegel vorhanden ist, und daß das Loch des Fokussierspiegels innerhalb des Ringmaximums des Ringmodes angeordnet ist, so kann eine Verringerung der Leistungsverluste der Strahlung im Bereich des Loches des Lochspiegels erreicht werden. Das ist insbesondere vorteilhaft, wenn ein vergleichsweise großes Loch gewählt wird, um eine möglichst hohe axiale Auflösung bzw. eine kleine axiale Tiefenschärfe zu erreichen.

Die Ausbildung der Beobachtungsoptik hinsichtlich der Anordnung ihres Fokus und damit hinsichtlich des diesem Fokus konjugierten Ebene kann die Vorrichtung so ausgebildet werden, daß das Werkstück sowohl im Auftreffpunkt bzw. Fokus der Laserstrahlung auf dem Werkstück beobachtet werden kann, als auch oberhalb oder unterhalb davon. Vorteilhaft im Sinne einer problemlosen Ermittlung eines Durchschweißens und einer Abstimmung der Vorrichtung zur Beobachtung des gesamten Querschnitts der Dampfkapillaren ist es, wenn der Fokus der Beobachtungsoptik an der Unterseite des Werkstücks angeordnet ist.

Die Erfindung wird anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zur Beobachtung eines Werkstücks beim Bearbeiten mit Laserstrahlung,

Fig. 2 den Signalverlauf beim Pulsen mit einem CO₂-Laser,

Fig. 3a bis 3c Erläuterungen zur Ausbildung einer Dampfkapillaren eines stationären Tiefschweißprozesses beim Laserstrahlschweißen mit einem CO₂-Laser,

Fig. 4 die Korrelation zwischen einem zeitlichen Sensorsignal und der Einschweißtiefe in Abhängigkeit von der Zeit,

Fig. 5 eine schematische Darstellung zu einer erfindungsgemäßen Beobachtungsoptik, und

Fig. 6 eine schematische Darstellung zu einer weiteren erfindungsgemäßen Beobachtungsoptik.

Fig. 1 zeigt schematisch ein Werkstück 10, das mit fokussierter Laserstrahlung 12 bearbeitet wird. Als Bearbeiten kommt, je nach Einsatz des verwendeten Lasers, ein Schweißen, Schneiden, Bohren, Abtragen oder Umschmelzen in Frage. Die vom Laser abgegebene Laserstrahlung 12' wird mittels eines Umlenkspiegels 25 auf einen Fokussierspiegel 15 gelenkt, der fokussierte Laserstrahlung 12 auf das Werkstück 10 lenkt. Der Fokus 24 liegt beispielsweise auf der Werkstückoberfläche 26. Als Fokussierspiegel 15 wird ein Lochspiegel eingesetzt, dessen Loch 27 innerhalb des Ringmaximums 28 der einen Ringmode 23 aufweisenden Laserstrahlung 12 angeordnet ist. Das Loch 27 läßt Freiraum für die Beobachtung der Werkstückoberfläche 26 im Bereich des Fokus 24 des Werkstücks 10. Zur Beobachtung wird eine Beobachtungsoptik 16 eingesetzt, die das Werkstück 10 genau in Richtung der Achse 11 der fokussierten Laserstrahlung 12 beobachtet. Von der Beobachtungsoptik 16 aufgenommenes Licht wird auf einen Lichtleiter 29 gebündelt, der die Beobachtungsoptik 16 mit einer Auswerteeinheit 19 verbindet, mit dem eine Meßwertauswertung erfolgt.

Damit die Beobachtungsoptik 16 eine möglichst hohe Auflösung erreicht, wird das Loch möglichst groß gewählt. Zu diesem Zweck besitzt die Beobachtungsoptik 16 auch eine möglichst kleine Brennweite. Der Fokus 30 der Beobachtungsoptik 16 ist bei dem dargestellten Beispiel der Fig. 1 an der Unterseite 10' des Werkstücks 10

angeordnet. Die Bearbeitungsoptik 16 beobachtet also ausschließlich oberhalb des Fokus 24 im Bereich der gesamten Werkstückdicke 14. Der Fokus 30 der Beobachtungsoptik 16 könnte aber auch anders angeordnet werden, beispielsweise so, daß sowohl oberhalb als auch unterhalb des Fokus 24 beobachtet werden kann, nämlich mit vergleichsweise großer Tiefenschärfe innerhalb der Wechselwirkungszone der Laserstrahlung 12 mit dem Werkstück 10. Es ist möglich, den Fokus 30 so anzuordnen, daß auch oberhalb des Werkstücks 10 beobachtet werden kann.

Der Beobachtungsprozeß erfolgt während des Pulsbetriebs des Lasers, wie auch während der Pulspause. Als Laser kommt beispielsweise ein CO₂-Laser zum Einsatz. Statt des als Fokussierspiegel 15 ausgebildeten Lochspiegels kann auch ein GaAs-Fenster eingesetzt werden, welches das Licht des CO₂-Lasers durchläßt, aus der Wechselwirkungszone des Werkstücks 10 herührendes Licht jedoch nicht durchläßt, so daß eine Beobachtung der die Wechselwirkungszone bildenden Dampfkapillaren 13 möglich ist. Ebenso ist der Einsatz eines ZnSe-Fensters möglich, welches das Licht des CO₂-Lasers reflektiert, aus der Wechselwirkungszone stammendes sichtbares Licht jedoch durchläßt. Anstelle eines CO₂-Lasers kann für die Materialbearbeitung auch ein Nd-YAG-Laser eingesetzt werden.

Die Beobachtungsoptik 16, mit der der Beobachtungsvorgang axial zum einfallenden fokussierten Laserstrahl 12 ermöglicht wird, ist mit einem Bandpaßfilter versehen. Der Bandpaßfilter beschränkt das ein fallende Licht auf 500 nm \pm 5 nm und damit auf denjenigen Wellenlängenbereich des gesamten Strahlungsspektrums, der von der Emission des laserinduzierten Plasmas dominiert wird. Die Schärfentiefe der Beobachtungsoptik läßt sich variieren. Sie ist bei so eingestellt, daß die gesamte Wechselwirkungszone bzw. Dampfkapillare 13 bzw. die Werkstückdicke 14 durch die Beobachtungsoptik erfaßt wird. Die Auflösung der Optik in radialer Richtung, also quer zur Achse 11 ist auf einen Meßbereich von 0,5 mm eingestellt. Das bedeutet, daß das von der Vorrichtung in Fig. 1 ermittelte Signal integral die Emission des gesamten Bereichs der Dampfkapillaren wiedergibt, wenn die Absorptionsfront 41 die in Fig. 3a dargestellte durchschnittliche Neigung hat und die Kapillartiefe 5 mm beträgt.

Fig. 2 zeigt einen beispielsweise mit der Auswerteeinheit 19 ermittelten Signalverlauf beim Pulsen mit einem CO₂-Laser dessen Leistung mit einer Frequenz von 10 Hz moduliert wurde. Das tiefere Niveau lag bei etwa 3 kW, wie Fig. 2 unten zeigt, während das höhere bei etwa 6 kW lag. Bei den vorgegebenen Prozeßparametern war bei den niedrigeren Leistungen das laserinduzierte Plasma nahezu erloschen. Während dessen erfolgt ein Schweißprozeß mit geringer Einschweißtiefe in der Größenordnung des Strahldurchmessers. Es erfolgt ein Wärmeleitungsschweißen. Bei hoher Laserleistung wird ein Tiefschweißprozeß erreicht, indem mit der Laserstrahlung 12 ein Plasma induziert wird. Dabei trifft die Laserstrahlung 12 zum Zeitpunkt des Einschaltens der hohen Leistung auf ein vorgewärmtes Schmelzbad, dessen Oberfläche immer noch eine Temperatur nahe der Dampftemperatur aufweist. Bei dieser Prozeßführung kann am besten erläutert werden, welche charakteristische Auswirkung das Tiefschweißen auf das Strahlungssignal hat, welches von dem erzeugten Plasma ausgeht.

Zu Beginn des Intervalls hoher Laserleistung trifft die Laserstrahlung 12 auf eine glatte Schmelzoberfläche 31.

Die Schmelze 32 des Werkstücks 10 befindet sich in einer vom festen Werkstück 10 gebildeten Vertiefung 33. Oberhalb der Schmelze bildet sich in Plasma 34 aus. Zwischen dem Plasma 34 und der Schmelze 32 befindet sich die Absorptionsfront 41, also die Phasengrenze flüssig-gasförmig, nämlich der Bereich, in dem die Laserstrahlung 12 auf die flüssige Wand der Dampfkapillaren 13 trifft. Zwischen der Schmelze 32 und dem festen Werkstück 10 befindet sich die Schmelzfront 35, also die Phasengrenze flüssig-fest. Die Tiefe der Schmelzfront gibt die Eindringtiefe an, also beim Plasmaschweißen, unter Vernachlässigung der Tiefe der Absorptionsfront, die Tiefe der Dampfkapillaren.

Das Plasma 34 leuchtet und das emittierte Licht wird von der oben beschriebenen Beobachtungsoptik 16 aufgenommen, wobei für die Interpretation des Signalverlaufs die oben genannten Anordnungen und Daten dieser Beobachtungsoptik 16 von Bedeutung sind. Wenn die Beobachtung des Plasmas in einem beschränkten Wellenlängenbereich erfolgt, in dem es als optisch dünn angesehen werden kann, ist die beobachtete Intensität der Strahlung proportional zur Anzahl der Teilchen, die im Beobachtungsbereich biegen. Wird axial zur Bearbeitungsrichtung über die gesamte Dicke des Werkstücks 10 scharf beobachtet, so ist die gemessene Intensität des Lichts des Plasmas in erster Näherung proportional zur Eindringtiefe der Dampfkapillaren in das Werkstück. Da der Prozeß nicht ideal verläuft, sind Dichte und Temperatur innerhalb der Dampfkapillaren nicht konstant, weil z. B. ein partielles Schließen der Dampfkapillaren bei Bewegung von Absorptions- und Schmelzfront eine erhöhte Verdampfungsrate während der Relaxation in den stationären Zustand erfordert. Darüberhinaus hängt das emittierte Licht bzw. dessen Intensität auch von Bearbeitungsparametern und Einflußgrößen ab. Die grundlegenden Vorgänge lassen sich jedoch anhand der Fig. 3a bis 3c erläutern, mit denen auch der Signalverlauf im oberen Teil der Fig. 2 erklärt werden kann.

Da die Absorptionsfront 41 gemäß Fig. 3a zunächst eine geringe Tiefe aufweist, wird durch die hohe Intensität der Laserstrahlung schlagartig eine große Menge von Bearbeitungsmaterial abgedampft. Die kurzzeitig hohe Materialdichte führt zu einer hohen Absorption der Laserstrahlung und damit zu einer hohen Temperatur im abgedampften Material. Der Vorgang läuft so schnell ab, daß das verdampfte Material nicht expandieren kann. Die Strahlungsintensität steigt daher schlagartig und ergibt sich ein Intensitätsspitzenwert. Währenddessen wird noch keine merkliche Bewegung der Absorptionsfront 41 und erst recht noch keine Bewegung der Schmelzfront 35 erreicht.

Bedingt durch das Aufheizen des Materialdampfes wird hier ein Überdruck gegenüber der Umgebungsummosphäre erzeugt. Es kommt zur Expansion des Metaldampfes. Daraus resultiert ein Rückgang der Temperatur des Plasmas und der Metaldampfdichte. Die Intensität der Plasmastrahlung sinkt. Der vorbeschriebene Prozeß ist in Fig. 2 mit 1 gekennzeichnet.

Andererseits drückt der expandierende Metaldampf auf die Schmelze 32 und es beginnt die Ausbildung einer Dampfkapillaren. Die Schmelze 32 wird zum großen Teil verdrängt. Am tiefsten Punkt der Dampfkapillaren und an der Absorptionsfront 41 ist aufgrund der hohen Laserleistung noch immer ein Überschuß an Intensität vorhanden, so daß die Laserstrahlung zum Teil reflektiert wird und damit die Dampfkapillare wieder verläßt und zum Teil in Abdampfarbeit und Bewegung der

Schmelzfront umgesetzt wird. Es beginnt ein Bohrprozeß in das feste Werkstück 10 hinein. Fig. 3b zeigt einen Teilstrahl 12'' der Laserstrahlung 12, die zum Teil reflektiert und zum Teil absorbiert wird. Zu Beginn der Entstehung der Dampfkapillaren erfolgen vornehmlich Bewegungen an der Absorptionsfront 41 aufgrund des Rückstoßdruckes des verdampfenden Materials ohne merkliche Bewegungen der Schmelzfront 35.

Infolge der Einkopplung von Energie über das Plasma in die Absorptionsfront 41 und deren Bewegung in Richtung auf die Schmelzfront 35 beginnt der eigentliche Bohrprozeß in das feste Material des Werkstücks 10 hinein. Die Schmelzfilmdicke an der Absorptionsfront 41 wird geringer. Am Boden ist sie nahezu nicht vorhanden, wie Fig. 3c zeigt. Das bedeutet aber, daß der dünne Schmelzfilm nur in sehr geringem Maße schwanken kann. Also wird die beobachtete Intensität der Plasmastrahlung dann nur noch von geringen Schwankungen überlagert. Dies wird im Verlauf des Plasmasignals, also des Verlaufs der Intensität der Plasmastrahlung, in Abhängigkeit von der Zeit sehr deutlich.

Bei weiterem Eindringen der Dampfkapillaren in das feste Werkstück 10 wird die Dampfkapillare im Mittel so tief, daß die zweite Reflexion auf die Wände oder auf den Boden der Dampfkapillaren 13 trifft, vgl. Fig. 3c. Damit erhöht sich die insgesamt absorbierte Laserleistung um den Anteil der zweiten Reflexion, was zum Signalsprung führt. Weitere Reflexionen der Laserstrahlung innerhalb der Dampfkapillaren führen zur Strahlungsabsorption und entsprechenden weiteren Sprüngen im Signalverlauf. Die durch die weiteren Reflexionen bedingten Signalniveaus sind nicht mehr aufzulösen und der mittlere Signalanstieg wird beendet sein, wenn über den Effekt der Mehrfachreflexion die CO₂-Strahlung fast völlig absorbiert ist. Dieser Quasigleichgewichtszustand wird allerdings durch eine starke Zunahme der Signalschwankungen angezeigt. Die Ursache hierfür ist, daß für ein weiteres Bohren in das feste Material hinein nicht genug Leistung vorhanden ist. An der Kapillarfront wird daher nur soviel Werkstoff abgedampft, wie nötig ist, um die Kapillare bei gegebener Vorschubgeschwindigkeit in den Festkörper hineintreiben zu können. Zunehmend spielt die langsamere Wärmeleitung eine Rolle und es bildet sich ein dickerer Schmelzefilm aus, womit wiederum die starke Zunahme der Signalschwankungen zusammen hängt. Dieser Bereich ist mit 2 gekennzeichnet.

Zuvor erfolgen Bewegungen der Absorptionsfront aufgrund des Rückstoßdruckes verdampfenden Werkstoffs ohne merkliche Bewegung der Schmelzfront. Die zugeordnete Form des Strahlungssignals ist eine starke Schwankung um den mittleren Signalwert. Die Plasmabildung und die folgenden Bewegungen der Absorptionsfront halten so lange an, daß auch die Schmelzfront mit erhöhter Geschwindigkeit läuft. In diesem Fall sind die starken Schwankungen des Signals unterdrückt. Die vorgenannten Abläufe sind in Fig. 2 mit 3 gekennzeichnet.

Wegen der starken Signalschwankungen ergeben sich bei der Ermittlung der Eindringtiefe aufgrund des Signalverlaufs nach Fig. 2 erhebliche Schwierigkeiten. Die Schwankungen enthalten aber auch Informationen über Vorgänge in der Dampfkapillaren, die auch für die Bestimmung der Eindringtiefe notwendig sind. Mit Hilfe einer geeigneten Mittelung kann aus dem Signalverlauf trotz der starken Signalschwankungen eine mittlere Eindringtiefe selektiert werden. Eine solche zeitliche Mittelung ist in Fig. 4 dargestellt. Aus dem Vergleich

der Zeitmaßstäbe der Fig. 2 und 4 ergibt sich, daß der Signalverlauf nach Bild 2 der Anstiegsphase in Bild 4 entspricht. Insgesamt ergibt sich in Fig. 4 unter Beachtung des unten dargestellten Werkstückquerschnitts, daß die Eindringtiefe bzw. die Einschweißtiefe qualitativ und quantitativ durch das gemittelten Sensorsignal sehr gut wiedergegeben wird.

Die beim Materialbearbeiten auftretenden Signalbesonderheiten stören das Meßergebnis. Es sind dies zeitlich isolierte Intensitätsspitzenwerte, sogenannte Signalpeaks, die infolge einer starken und schnellen Aufheizung der Oberfläche auftreten. Während der kurzen Zeiten dieser Signalpeaks ist eine Bewegung der Absorptions- bzw. der Schmelzfront nicht möglich. Des weiteren treten ausgeprägte quasi periodische Schwankungen des Signals um den stationären mittleren Signalwert auf, die von hydrodynamischen Schwingungen der Absorptionsfront in der Dampfkapillare herrühren. Um die dadurch bedingten Verfälschungen des Signalverlaufs ausschalten zu können, können getriggerte Filter eingesetzt werden. Die Triggerung erfolgt, indem akustische und/oder optische Signale herangezogen werden, die z. B. infolge starker Verdampfung auftreten und von der Seite beobachtet werden können, also von außerhalb der Achse 11 der Laserstrahlung 12.

Es ist auch möglich, Intensitätsspitzenwerte sowohl in der Achse 11 der Laserstrahlung 12 zu beobachten, als auch seitlich davon. Durch Laufzeitmessung bzw. Ermittlung der Laufzeitdifferenzen eines in der Achse der Laserstrahlung ermittelten Signals und eines seitlich davon ermittelten Signals läßt sich der Entstehungsort des Signalwerts in der Dampfkapillaren ermitteln. Diese Messung kann zur Fehlerermittlung herangezogen werden.

Der Lokalisierung von speziellen Vorgängen innerhalb der Dampfkapillaren kommt besondere Bedeutung zu. Es können besondere Ausgestaltungen von Vorrichtungen zur Beobachtung der Plasmastrahlung eingesetzt werden, um lokale Abbildungen aus der Dampfkapillaren über deren Tiefe verteilt zu erreichen. Fig. 5 zeigt in schematischer Darstellung die Ausgestaltung einer Beobachtungsoptik mit einer Zylinderlinse 17. In den Foki 17' dieser Linse wird die zum jeweiligen Fokus konjugierte Ebene als Linie abgebildet. Diejenige konjugierte Ebene, die der am weitesten von der Zylinderlinse 17 entfernten Stelle des Objekts, also der tiefsten vorbestimmten Stelle innerhalb der Dampfkapillaren, zugeordnet ist, wird als am weitesten von der Zylinderlinse 17 entfernter Linienfokus 17' scharf abgebildet. Um die Dampfkapillare über die gesamte Tiefe erfassen zu können, ist es erforderlich, die jeweils interessierenden Linienfoki 17' zu erfassen. Hierzu wird eine der Zylinderlinse 17 im Strahlengang nachgeordnete Diodenzeile 18 eingesetzt, die jedoch im aus der Fig. 5 ersichtlichen spitzen Winkel zur Achse 11 angeordnet ist. Infolgedessen werden die unterschiedlichen Ebenen der Dampfkapillaren auf unterschiedlichen Dioden scharf abgebildet. Entsteht also ein Intensitätsspitzenwert im Bereich des Bodens der Dampfkapillare, so ist ein entsprechendes Diodensignal im Bereich der von der Zylinderlinse 17 am weitesten entfernten Dioden zu erwarten. Ein solches Diodensignal kann dann zum Triggern bei der Bildung des Mittelwertes der Strahlungsintensität benutzt werden, wie auch zum Dokumentieren des örtlichen Bereichs im Verlauf der Bahn der Materialbearbeitung. Aus der Gesamtheit der Ausgangswerte der Dioden der Diodenzeile 18 wird der Mittelwert der Intensität der Plasmastrahlung gebildet, der als Maß für

die Eindringtiefe angesehen werden kann.

Eine weitere spezielle Meßeinrichtung zeigt Fig. 6. In der optischen Achse 11 der Laserstrahlung 12 wird als Beobachtungsoptik 16 eine rotationssymmetrische Optik eingesetzt. Die Optik fokussiert die Strahlung, die in der zu ihrer Bildebene konjugierten Ebene entsteht, auf einen Punkt der optischen Achse 11. In diesen Punkt ist das Loch 36 einer Lochblende 37 angeordnet. Hinter dem Loch ist ein Lichtsensor 20 als Lichtwellenleiter vorhanden, der denjenigen Anteil der Plasmastrahlung des Beobachtungsfokus 30 ermittelt. Die Lochblende 37 hat weitere, vom Loch 36 radial entfernt liegende Löcher 38, denen Lichtsensoren 21 nachgeordnet sind. Diese sind ebenfalls als Lichtleiter ausgebildet und messen denjenigen Anteil der Plasmastrahlung, deren dominierender Signalanteil eben nicht in der konjugierten Ebene des Beobachtungsfokus 30 liegt. Auf diese Weise lassen sich gleichzeitig Signale in der Tiefe der Wechselwirkungszone der Dampfkapillaren und oberhalb oder unterhalb des Werkstücks 10 erfassen und miteinander vergleichen. In Fig. 6 liegen vier Löcher 38 auf demselben Radius vom Loch 36 entfernt. Im Prinzip genügt ein einziges Loch 38. Zur Ermittlung weiterer Informationen können die Löcher auf unterschiedlichen Radien angeordnet sein.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Materialbearbeiten mit Plasma induzierender Laserstrahlung, bei dem aus dem Bereich der Dampfkapillare des Werkstücks (10) herrührende Strahlung in der Achse (11) der auf das Werkstück (10) fokussierten Laserstrahlung (12) in Abhängigkeit von der Zeit beobachtet wird, dadurch gekennzeichnet, daß ausschließlich der Querschnitt der Dampfkapillaren (13) mit einer die gesamte Werkstückdicke (14) erfassenden Tiefenschärfe beobachtet wird, wobei der infolge dieser Beobachtung der Emission des gesamten Bereichs der Dampfkapillaren (13) bestimmte Mittelwert der Intensität der Plasmastrahlung als Maß für die Eindringtiefe verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Mittelwert der Strahlungsintensität unter Ausschaltung von Intensitätsspitzenwerten bestimmt wird, die gleichzeitig mit optischen und/oder akustischen Signalen auftreten, welche seitlich der fokussierten Laserstrahlung (12) ermittelt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Entstehungsort von Intensitätsspitzenwerten in der Dampfkapillaren (13) durch Laufzeitdifferenzmessung axialer und seitlicher einander zeitlich zugehöriger Meßwerte bestimmt wird.
4. Vorrichtung zum Materialbearbeiten mit Plasma induzierender Laserstrahlung (12), die von einem Spiegel (15) auf das Werkstück (10) fokussiert wird, mit einer vom Werkstück (10) herrührende Strahlung in der Richtung der fokussierten Laserstrahlung (12) beobachtenden Optik (16), die mit einer Zylinderlinse (17) auf eine im Strahlengang nachgeordnete Diodenzeile (18) abbildet, und mit einer Auswerteeinheit, zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der radiale Beobachtungsbereich der Beobachtungsoptik (16) auf den Querschnitt der Dampfkapillaren beschränkt ist, daß eine den Mit-

telwert der Intensität der Plasmastrahlung erfassende Meßeinrichtung vorhanden ist, und daß die Diodenzeile (18) im spitzen Winkel zur Achse (11) der beobachtenden Optik (16) schräggestellt und an die Auswerteeinheit (19) angeschlossen ist, welche die Ausgangswerte der einzelnen Dioden in Relation zu einem vorbestimmten Bezugswert auswertet.

5. Vorrichtung zum Materialbearbeiten mit Plasma induzierender Laserstrahlung (12), die von einem Spiegel (15) auf das Werkstück (10) fokussiert wird, und mit einer vom Werkstück (10) herrührende Strahlung in der Richtung der fokussierten Laserstrahlung (12) beobachtenden Optik (16), zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der radiale Beobachtungsbereich der Beobachtungsoptik (16) auf den Querschnitt der Dampfkapillaren beschränkt ist, daß eine den Mittelwert der Intensität der Plasmastrahlung erfassende Meßeinrichtung vorhanden ist, daß die Beobachtungsoptik (16) eine rotationssymmetrische Linse aufweist, auf deren optischer Achse (11) ein Lichtsensor (20) angeordnet ist, der denjenigen Strahlungsanteil erfaßt, der aus der dem Fokus (24) der Beobachtungsoptik (16) konjugierten Ebene herrührt, und daß mindestens ein weiterer Lichtsensor (21) außerhalb der optischen Achse (11) der Beobachtungsoptik (16) angeordnet ist, der einen Strahlungsanteil erfaßt, der aus einer dem Fokus (24) der Beobachtungsoptik (16) nicht konjugierten Ebene herrührt, und daß alle Lichtsensoren (20, 21) an eine Auswerteeinheit (19) angeschlossen sind, welche die gemessenen Strahlungsintensitäten in Relation zu einem vorbestimmten Bezugswert auswertet.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtsensoren (20, 21) Lichtwellenleiter sind.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der spektrale Bereich der vom Werkstück (10) herrührenden Strahlung mit einem Bandpaßfilter beschränkt ist.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserstrahlung (12) einen Ringmode (23) aufweist, daß ein Lochspiegel als Fokussierspiegel (15) vorhanden ist, und daß das Loch (22) des Fokussierspiegels (15) innerhalb des Ringmaximums (28) des Ringmodes (23) angeordnet ist.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Fokus der Beobachtungsoptik (16) an der Unterseite (10') des Werkstücks (10) angeordnet ist.

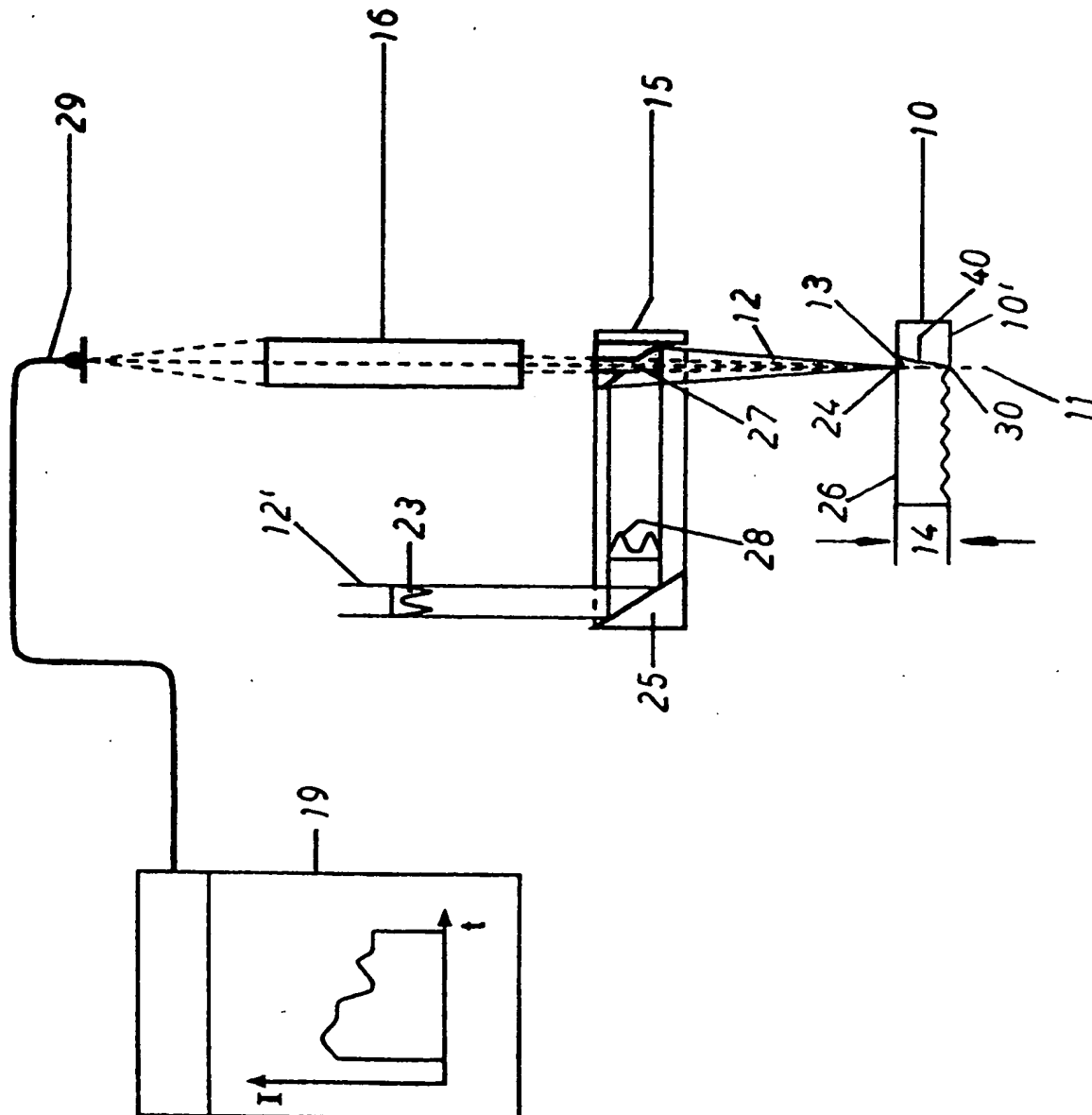
Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

55

60

65

FIG. 1



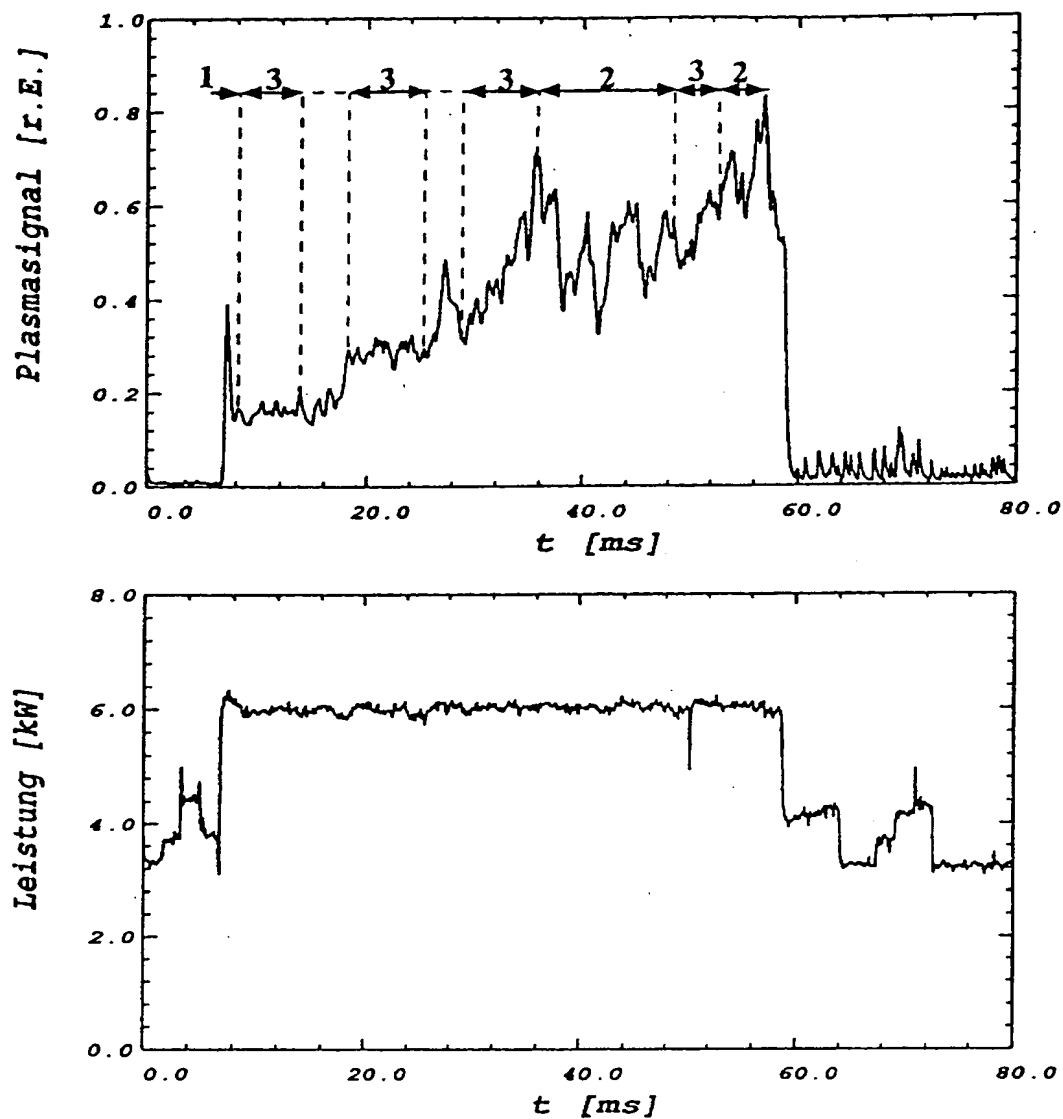


FIG.2

FIG. 3a

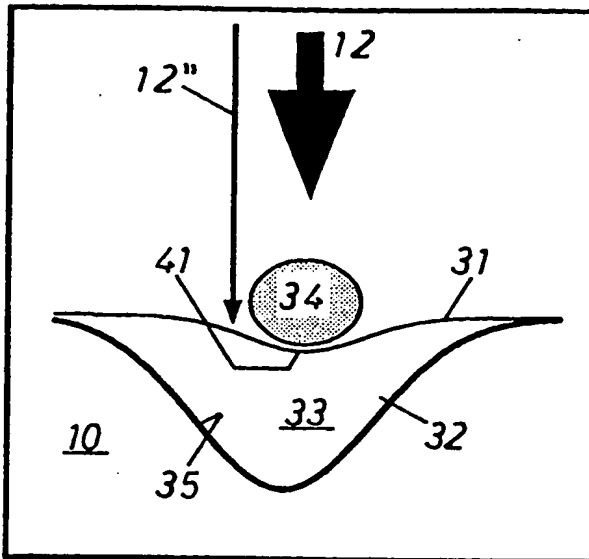


FIG. 3b

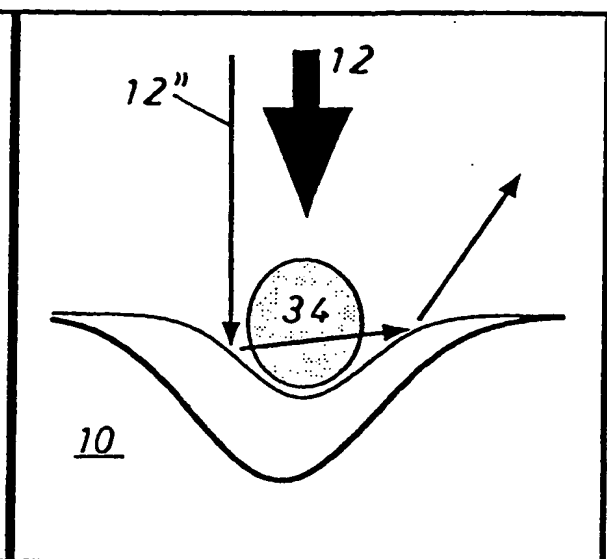
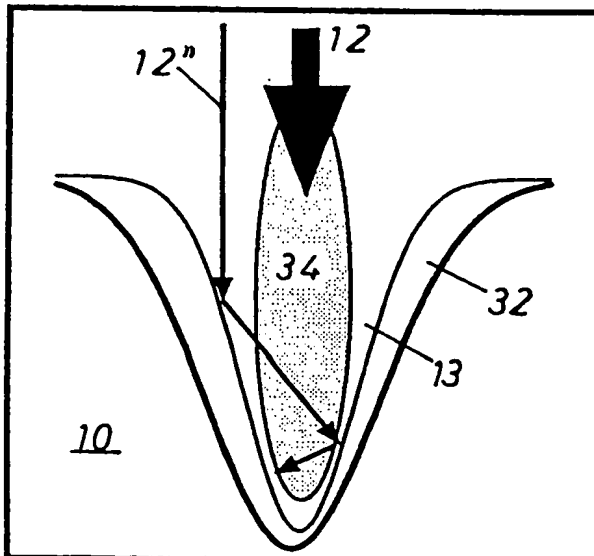
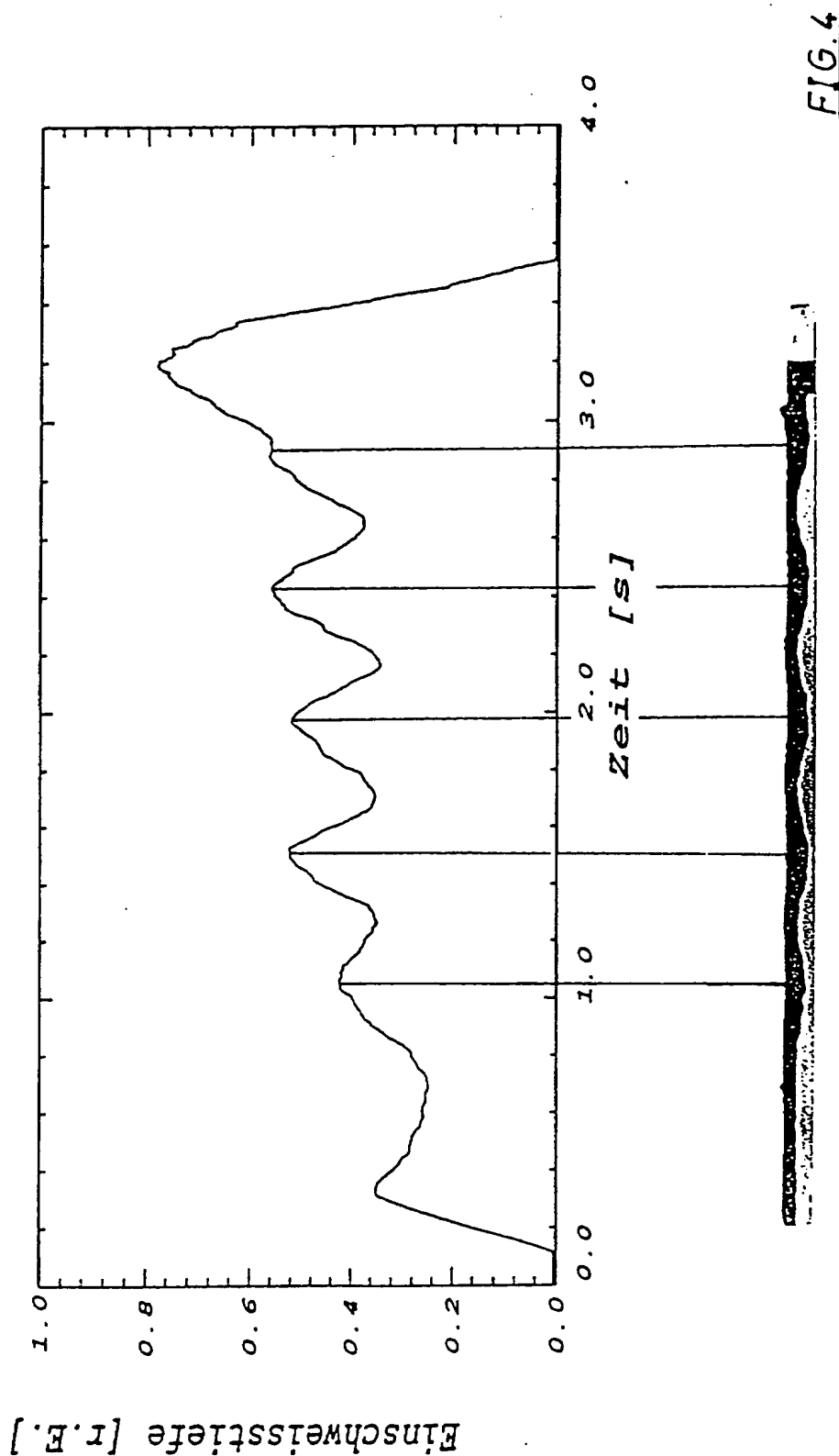


FIG. 3c





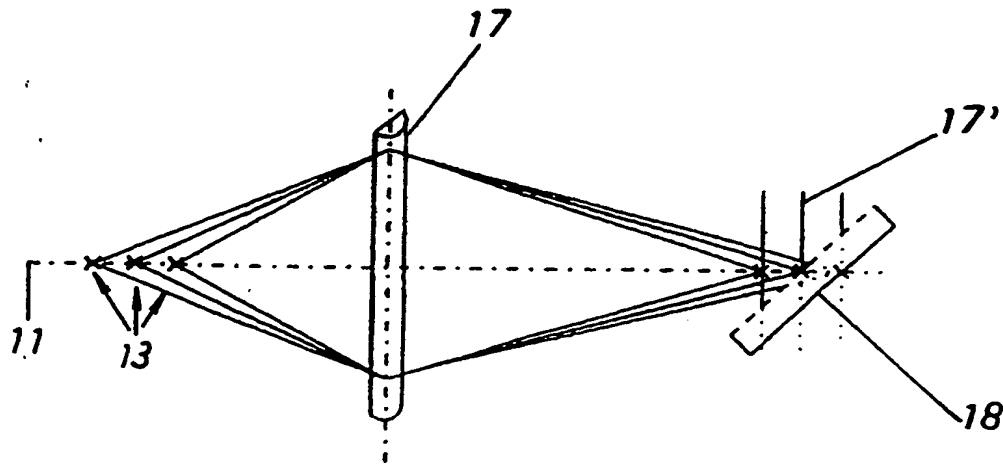


FIG. 5

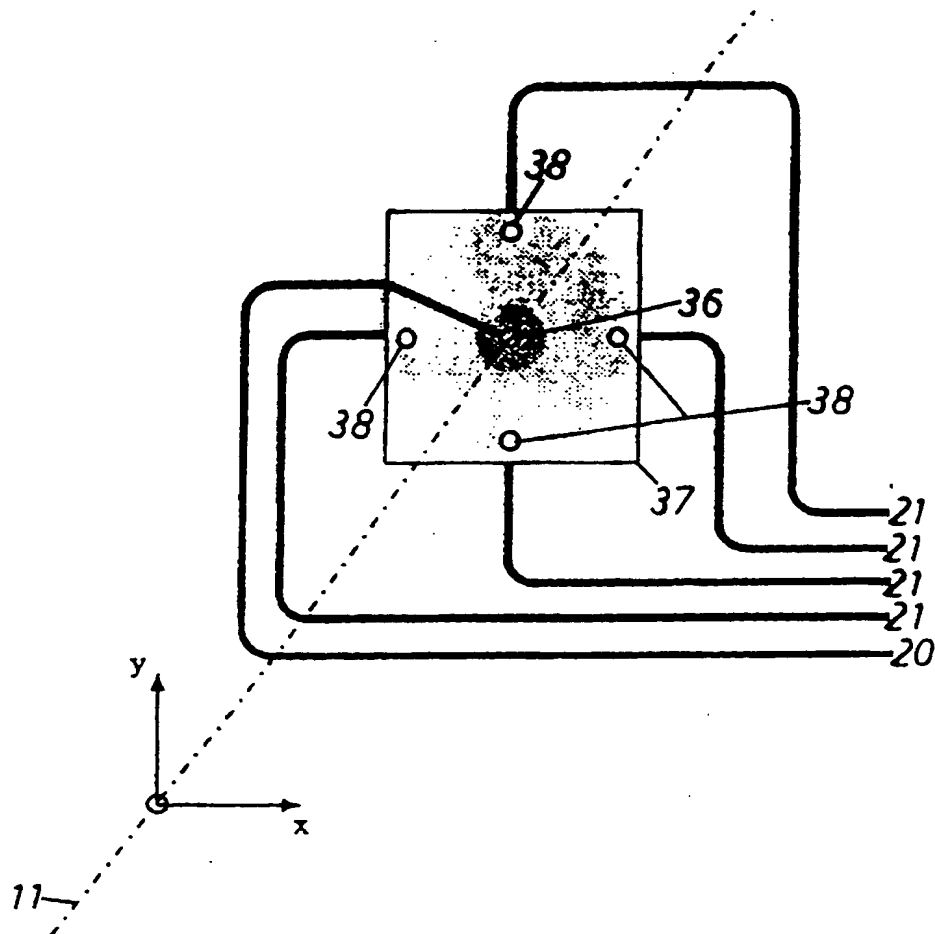


FIG. 6